

Научная статья
1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)
УДК 669.713.017:538.9
doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.006

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИНДУКЦИЕЙ ДО 0,5 Тл НА ДИНАМИКУ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВИНЦА

**Анна Александровна Серебрякова^{1†}, Дмитрий Валерьевич Загуляев²,
Виталий Владиславович Шляров³**

^{1, 2, 3} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

¹ aserebrakova87@gmail.com[†], <https://orcid.org/0000-0003-3979-7777>

² zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9859-8949>

³ ShlyarovVitaly@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

Аннотация. В работе отражены результаты исследований воздействия внешнего магнитного поля (МП) на деформационные характеристики диамагнитного материала свинца марки С2. Первоначально, были проведены исследования процесса ползучести и микротвердости в исходном состоянии, затем производились исследования данных характеристик с применением постоянного магнитного поля. Для более качественной оценки влияния магнитного поля на динамику микротвердости и процесс ползучести в работе варьировали индукцией магнитного поля (0,3 Тл, 0,4 Тл и 0,5 Тл). В качестве материала исследования применялся свинец С2 технически чистый (99,98 %). Результаты испытаний на ползучесть свидетельствуют о наличии неоднородного характера влияния магнитного поля на скорость ползучести, обнаружен знакопеременный эффект при увеличении значения индукции магнитного поля до 0,4 Тл и 0,5 Тл. Также, знакопеременный характер влияния магнитного поля установлен и при исследовании микротвердости. Кроме того, было обнаружено, что применение магнитного поля в процессе ползучести образца, количественно влияет на процент относительного остаточного удлинения при разрушении и продолжительность процесса ползучести. Выявлено рациональное время выдержки в магнитном поле при испытаниях на микротвердость, обнаружено, что максимальный эффект влияния магнитного поля проявляется при выдержке в течении 1 часа, в связи с чем дополнительно исследованы 2 режима выдержки в этом диапазоне (0,25 ч и 0,5 ч).

Ключевые слова: свинец, диамагнетик, магнитное поле, индукция, деформационные характеристики, относительное остаточное удлинение, ползучесть, микротвердость.

Для цитирования: Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В. Влияние магнитного поля с индукцией до 0,5 Тл на динамику деформационных характеристик свинца // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 1. С. 52–58. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.006.

Original article

INFLUENCE OF A MAGNETIC FIELD WITH INDUCTION UP TO 0.5 T ON THE DYNAMICS OF THE DEFORMATION CHARACTERISTICS OF LEAD

Anna A. Serebryakova^{1†}, Dmitry V. Zagulyaev², Vitaly V. Shlyarov³

^{1, 2, 3} Siberian State Industrial University, Kirova Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia

¹ aserebrakova87@gmail.com[†], <https://orcid.org/0000-0003-3979-7777>

² zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9859-8949>

³ ShlyarovVitaly@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

Abstract. The paper reflects the results of studies effect of a magnetic field (MF) on the deformation characteristics of a diamagnetic material lead grade C2. Initially, studies of the process of creep and microhardness in the initial state were carried out, then studies were carried out using a magnetic field in the process of creep of the samples and magnetic processing of the samples to study the dynamics of microhardness and the plasticity parameter. For the

study, the values of magnetic induction were chosen 0.3 T, 0.4 T and 0.5 T. The results of creep tests indicate the presence of an ambiguous nature of the influence of the magnetic field on the creep rate, a change in the sign of the effect was found with an increase in the value of the magnetic field induction to 0.4 T and 0.5 T. Also, the alternating nature of the influence of the magnetic field was also established in the study of microhardness. In addition, it was found that the use of a magnetic field in the process of sample creep quantitatively affects the percentage of relative residual elongation of the sample (decreased compared to the initial one with an increase in the magnetic field induction) upon destruction and the duration of the creep process (increases compared to the initial one at increase in magnetic field induction). A rational exposure time in a magnetic field during tests for microhardness was revealed, it was found that the effect of the influence of a magnetic field manifests itself maximum when holding for 1 hour, in connection with which 2 exposure modes in this range (0.25 h and 0.5 h).

Keywords: lead, diamagnet, magnetic field, induction, deformation characteristics, relative residual elongation, creep, microhardness.

For citation: Serebryakova, A. A., Zagulyaev, D. V. & Shlyarov, V. V. (2023). Influence of a magnetic field with induction up to 0.5 T on the dynamics of the deformation characteristics of lead. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(1), 52–58. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.006.

Введение

Интерес к изучению влияния магнитных полей на сплавы и металлы весьма актуален в последнее время [1-2]. Особенно это касается области магнитной обработки. По определению, магнитная обработка металлов и сплавов заключается в воздействии в течение некоторого времени на материал или готовое изделие постоянного, переменного или импульсного магнитного поля без каких-либо иных внешних воздействий с целью управляемого изменения структуры и свойств обрабатываемого объекта. Результаты данных воздействий зависят от многих факторов, в том числе и от магнитных свойств материала. Как известно, металлы и сплавы по своим магнитным свойствам классифицируются на несколько основных групп: парамагнетики, диамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики [3-4]. Каждая из этих групп изучается авторскими коллективами по всему миру. Так, например, в работах [5-6], группой исследователей представлен анализ экспериментальных данных по влиянию магнитного поля на микротвердость алюминиевых, медных, титановых и магниевых сплавов. Установлено, что происходит заметное изменение микротвердости сплавов, по сравнению с образцами, не подвергнутых выдержке в слабом магнитном поле. Подтверждено, что магнитное поле влияет на тип, структуру и свойства препятствия дислокаций в процессе пластической деформации. Исследования влияния магнитного поля на подвижность дислокаций [7] было проведено путем изменений индукции магнитного поля. Выявлено, что изменение интенсивности индукции магнитного поля в меньшую сторону, увеличивает пластичность материала.

Воздействие магнитного поля, как показали исследования, влияет на макропластические свойства металлов. В вышеприведенных публикациях, изучалось влияние магнитного поля на деформационное поведение меди, которая по своей магнитной природе является диамагнетиком. В данной работе, показаны результаты исследований диамагнитного материала, такого как свинец марки С2, что является актуальным для продолжения изучения деформационного поведения диамагнетиков во внешнем магнитном поле.

Материалы и методы исследований

В качестве исследуемых характеристик выбраны скорость ползучести, процент относительного остаточного удлинения, продолжительность процесса ползучести, микротвердость. Выбор данных характеристик обусловлен тем, что детали и составные части приборов, изготавливаемые из исследуемого материала постоянно подвержены механическим повреждениям в процессе эксплуатации.

В качестве материала для исследований процесса ползучести использован свинец марки С2 (проволока диаметром 2 мм) 99,98 % чистоты, содержание примесей не превышало 0,12 %. Для испытаний на микротвердость применялись образцы свинца С2 в форме прямоугольного параллелепипеда, высотой 12 мм, шириной 5 мм, длиной 15 мм.

Процесс ползучести исследовали на установке, разработанной и изготовленной в СибГИУ, с электромагнитом и датчиком движения [8]. Значения индукции МП регулировались путем изменения силы тока в катушках и составили: 0,3 Тл, 0,4 Тл и 0,5 Тл.

Обработку магнитным полем перед процедурой микроиндентирования в настоящей работе проводили по четырем режимам. Режимы 1, 2, 3 и 4 представляли собой выдержку внутри поля со значениями магнитной индукции B 0,3 Тл, 0,4 Тл, 0,5 Тл в течение 1 ч, 2 ч, 3 ч, 4 ч. После чего проводилась процедура микроиндентирования. Процедура микроиндентирования проводилась на микротвердомере HVS-1000 по Виккерсу. Испытательная нагрузка: 10 г. Время нагружения и под нагрузкой составляло 10 с время разгрузки 5 с. Обработка массива данных, полученных в ходе эксперимента, проводилась в Excel и Origin Pro 8.

Результаты и их обсуждение

На основании данных механических испытаний (удлинение образца – ϵ , мм и время процесса t , ч) построены кривые процесса ползучести технически чистого свинца (рис.1).

На рис.1 представлены наиболее характерные кривые ползучести, полученные при разрушении свинца в исходном состоянии « $\epsilon_{исх}$ » и при воздействии постоянного магнитного поля « $\epsilon_{мп}$ », которые содержат стадии логарифмической, установившейся и ускоренной ползучести. Линейная стадия обозначена сплошной линией. Скоростью ползучести является тангенс угла наклона этой линии. В исходном состоянии скорость ползучести составила 0,902 мм/ч (рис.1, $\epsilon_{исх}$). При включении магнитного поля на всем протяжении процесса ползучести можно отметить динамику значений скорости ползучести в зависимости от величины индукции магнитного поля. При значении индукции $B=0,3$ Тл, скорость ползучести составила

1,692 мм/ч (рис.1, $\epsilon_{мп0,3}$), по сравнению с исходным значением произошло увеличение на 87 %. При индукции $B=0,4$ скорость ползучести показывает снижение по сравнению с исходной, и составляет 0,0919 мм/ч (рис.1, $\epsilon_{мп0,4}$). Со значением индукции $B=0,5$ Тл скорость ползучести также снизилась по сравнению с исходными значением и составила 0,0662 мм/ч (рис.1, $\epsilon_{мп0,5}$). Таким образом, вследствие применения увеличенных значений индукции в процессе ползучести, скорости снизились на 94 % и 97 % соответственно.

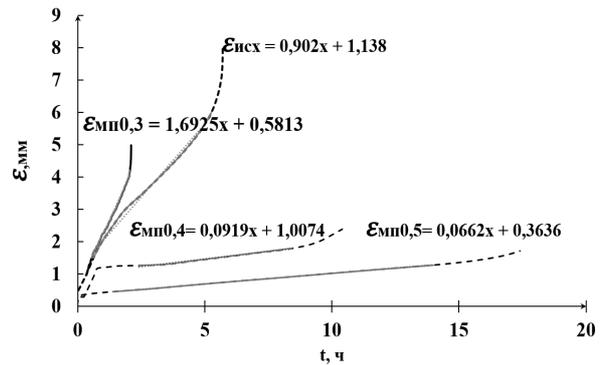


Рис.1. Кривые ползучести поликристаллического свинца в исходном состоянии (« $\epsilon_{исх}$ ») и при воздействии магнитного поля (« $\epsilon_{мп}$ ») с индукцией $B=0,3$ Тл, $B=0,4$ Тл, $B=0,5$ Тл

Fig.1. Creep curves of polycrystalline lead in the initial state (« ϵ_{ini} ») and when exposed to a magnetic field (« ϵ_{mf} ») with induction $B=0.3$ T, $B=0.4$ T, $B=0.5$ T

Далее проанализируем изменения процента относительного остаточного удлинения образца δ и длительности процесса $t_{проц}$ по данным на рис.2.

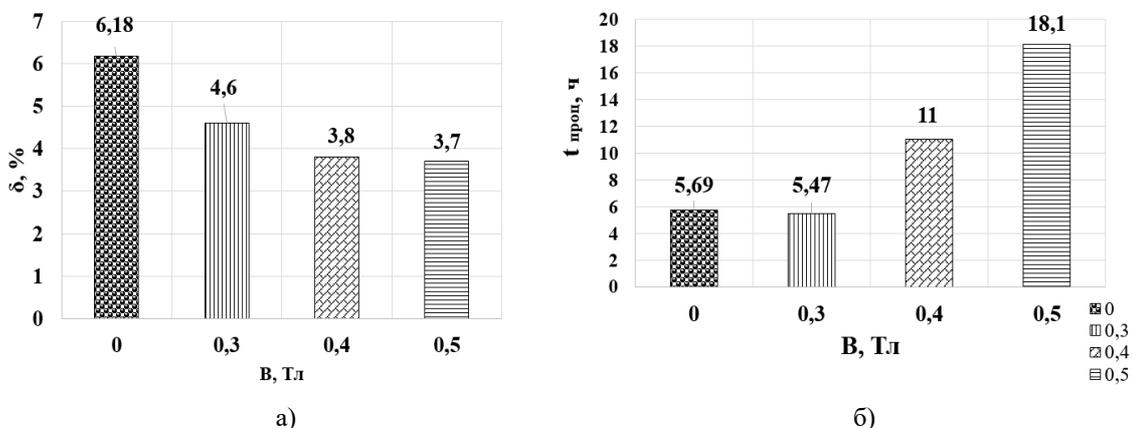


Рис.2. Зависимость процента относительного остаточного удлинения образца при разрушении δ (а) и продолжительности процесса ползучести $t_{проц}$ (б) от B , Тл

Fig.2. Dependence of the percentage of relative residual elongation of the sample at failure δ (a) and the duration of the creep process t_{proc} (b) on V , T

На рис.2а приведен процент относительного остаточного удлинения образца при испытаниях без магнитного поля, $\delta_{исх}=6,18$ %. Далее по гистограмме (рис.2а), можно отметить монотонное снижение процента относительного остаточного удлинения образца по мере увеличения значений индукции магнитного поля В, применяемого в процессе пластической деформации. При деформации и разрушении образцов в МП со значением В=0,3 Тл, процент относительного остаточного удлинения образца снизился до $\delta_{0,3}=4,6$ % (рис.2а). С повышением величины индукции до В=0,4 Тл и В=0,5Тл, проценты относительного остаточного удлинения образца составили $\delta_{0,4}=3,8$ % (рис.2а) и $\delta_{0,5}=3,7$ % (рис.2а) соответственно. Максимальное снижение процента относительного остаточного удлинения образца выявлено при воздействии в процессе ползучести индукции В=0,5 Тл, что в 1,6 раз меньше чем в исходном состоянии, при отсутствии магнитного поля.

Далее, рассмотрим динамику средней продолжительности процесса. Значение средней продолжительности процесса рассчитывалось по показателям 5 образцов для каждого режима. Выявлены следующие значения длительности: без воздействия МП $t_{проц} = 5,69$ ч; при В=0,3 Тл $t_{проц0,3}= 5,47$ ч; при В=0,4 Тл $t_{проц0,4}=11$ ч, а при В=0,5 Тл $t_{проц0,5}=18,1$ ч. По данным значениям и на гистограмме рис.2б, видно, что при применении магнитного поля с В=0,3 Тл произошло незначительное сокращение продолжительности процесса. Затем, с увеличением индукции применяемого в ползучести магнитного поля, продолжительность процесса возрастает. Максимальное увеличение в 3,1 раза установлено при воздействии на свинец индукцией В=0,5 Тл. Отметим, что наблюдается корреляция: с увеличением магнитного поля процесс ползучести стал длиться более долго, а подвергаться деформации наоборот стал меньше (исходя из динамики процента относительного остаточного удлинения). Можно предположить, что увеличение магнитного поля тормозит процесс образования дислокаций в материале и разрушение происходит в несколько раз медленнее.

В таблице 1 представлены результаты исследования влияния магнитного поля на микротвердость свинца марки С2. На каждый режим было выполнено по 20 измерений микротвердости, в таблице представлены усредненные данные. В процессе испытаний было использовано 3 образца, по одному на каждое значение индукции. Среднее значение HV образца без выдержки в магнитном поле составляет 7,51.

Таблица 1. Результаты исследований микротвердости свинца марки С2 в магнитном поле при различных значениях индукции

Table 1. Results of studies of the microhardness of lead grade С2 in a magnetic field at various values of induction

t, час \ В, Тл	0,3	0,4	0,5
	HV	HV	HV
0	7,22	7,7	7,62
1	6,73	8,875	9,68
2	6,655	8,87	9,69
3	6,66	8,874	9,7
4	6,66	8,875	9,69

Исследования изменения микротвердости во внешнем магнитном поле (Табл.1), были проведены при времени выдержки 1, 2, 3 и 4 часа и в исходном состоянии. На основании данных микроиндентирования установлено, что максимальный эффект влияния обнаруживается при времени экспозиции в магнитном поле в течение 1 часа (выделено цветом в Табл.1) и наблюдается сразу после изъятия образца из магнитного поля (начальный эффект). В связи с этим был расширен диапазон времен обработки, так как появился вопрос о поведении микротвердости в промежутке от 0 до 1 ч. Дополнительно, анализ изменений микротвердости в условиях действия магнитного поля проводили также для трех значений индукции 0,3, 0,4 и 0,5 Тл и двух времен выдержки в магнитном поле 0,25 часа, 0,5 часа, сразу после выдержки образцов в магнитном поле. На основании исследований микротвердости (HV), построены зависимости динамики данных величин от времени выдержки (0 ч, 0,25 ч, 0,5 ч, 1 ч) и значений индукций магнитного поля (0,3 Тл, 0,4 Тл и 0,5 Тл) (рис.3).

Обнаружен неоднозначный характер динамики микротвердости (HV) (рис.3), при индукции магнитного поля 0,3 Тл происходит снижение микротвердости, а при индукции 0,4 Тл и 0,5 Тл наблюдается противоположный характер. В ходе исследований установлено, что влияние магнитного поля с индукцией 0,3 Тл на микротвердость свинца С2 выражается снижением микротвердости на 7,2 % (за 1 час обработки произошло снижение с 7,22 до 6,735, на рис.3а) по сравнению с исходным значением (Табл.1). Таким образом, снижение на этом участке носит монотонный характер, критичных изменений при времени выдержки 0,25 ч и 0,5 ч не наблюдается. Снижение микротвердости может свидетельствовать о повышении пластичности материала под действием магнитного поля.

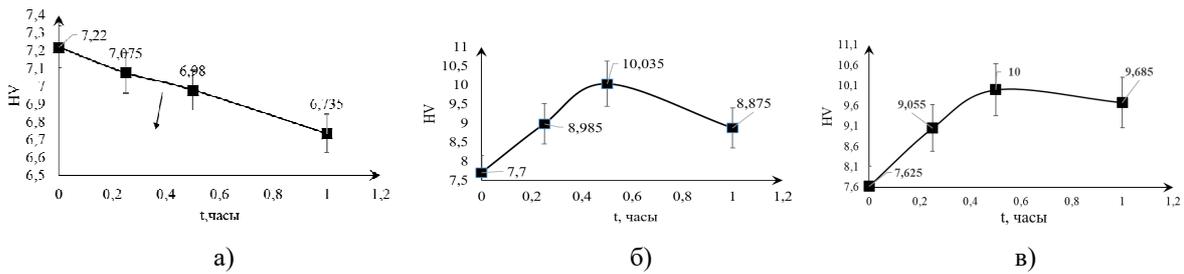


Рис.3. Зависимость изменения HV от времени выдержки в диапазоне от 0 до 1 ч:
а) $V=0,3$ Тл; б) $V=0,4$ Тл; в) $V=0,5$ Тл

Fig.3. Dependence of HV change on exposure time in the range from 0 to 1 h:
а) $V=0.3$ T; б) $V=0.4$ T; в) $V=0.5$ T

Исследования динамики микротвердости свинца на дополнительных значениях времени с повышенными значениями индукции до 0,4 Тл и 0,5 Тл, наоборот, показывают повышение твердости материала. Микротвердость свинца при воздействии магнитного поля с индукцией 0,4 Тл увеличилась на 23,75 % (за 0,5 ч. обработки произошло увеличение с 7,7 до 10,035, на рис.3б) по сравнению с исходным значением. Значение микротвердости свинца при воздействии магнитного поля с индукцией 0,5 Тл увеличилось на 23,26 % (за 0,5 ч обработки произошло увеличение с 7,6 до 10, на рис.3в) по сравнению с начальным значением. Максимально измененные под воздействием магнитного поля разной величины значения микротвердости в сравнении со значением без магнитного поля показаны на рис.4.

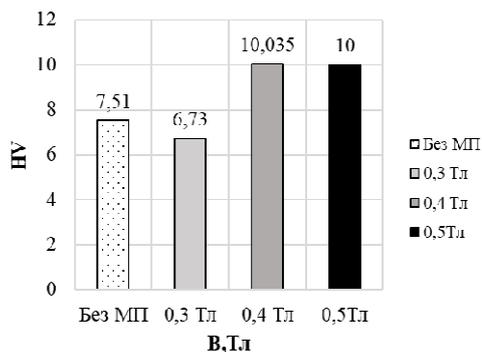


Рис.4. Зависимость значений микротвердости HV от применения магнитного поля и значений индукции V

Fig.4. Dependence of the values of microhardness HV on the application of a magnetic field and values of induction V

Выводы

1. Выполнены испытания на ползучесть и микротвердость образцов диамагнитного свинца

марки С2, получены данные о динамике деформационных характеристик.

2. Проанализированы скорости ползучести на линейной стадии без магнитного поля и с магнитным полем при значениях индукции V , 0,3, 0,4 и 0,5 Тл. Установлено, что при $V=0,3$ Тл, скорость ползучести увеличилась на 87 %, а при $V=0,4$ и 0,5 Тл скорость ползучести снижается по сравнению с исходными значениями на 94 % и 97 % соответственно.

3. Установлено, что процент относительного остаточного удлинения образцов до разрушения δ при ползучести свинца снижается по мере увеличения индукции МП. Максимальное снижение процента относительного остаточного удлинения образца выявлено при воздействии в процессе ползучести индукции $V=0,5$ Тл, что в 1,6 раз меньше чем в исходном состоянии, при отсутствии магнитного поля.

4. Выявлены следующие значения длительности: без воздействия МП $t_{\text{проц}} = 5,69$ ч; при $V=0,3$ Тл – $t_{\text{проц}0,3} = 5,47$ ч; при $V=0,4$ Тл – $t_{\text{проц}0,4} = 11$ ч, а при $V=0,5$ Тл – $t_{\text{проц}0,5} = 18,1$ ч. Максимальное увеличение в 3,1 раза установлено при воздействии на свинец индукцией $V=0,5$ Тл. Выявлена корреляция: с увеличением магнитного поля процесс ползучести стал длиться более долго, а подвергаться деформации наоборот стал меньше.

5. Измерения микротвердости показали неоднозначный (знакопеременный) характер влияния магнитного поля на пластические свойства свинца. Отличие явлений наблюдается при изменении индукции, переход с $V=0,3$ Тл на значения $V=0,4$ Тл и $V=0,5$ Тл при обработке образцов показывает увеличение микротвердости. Подобный случай выявлен в исследованиях алюминия [8].

6. При увеличении времени обработки более 1 часа, при всех значениях индукции, не

происходит значительных изменений. Диапазон выдержки в МП от 0,25 ч до 1 ч оказывает наибольший эффект. А именно, максимальное увеличение HV при выдержке 0,5 ч с индукцией $B=0,4$ Тл и $B=0,5$ Тл составило 10,035 и 10, что на 23,75 % и 23,26 % больше по сравнению с исходным значением. Максимальное снижение обнаружено при выдержке 1ч. с индукцией $B=0,3$ Тл составило 6,73, что на 7,2 % меньше чем в исходном состоянии.

7. Таким образом, в ходе исследований выявлен эффект воздействия магнитного поля на деформационные характеристики свинца. Предположительно, причиной эффекта является воздействие индукции магнитного поля на процессы образования и движение дислокационной субструктуры материала [10]. Подтвердить эти предположения планируется в дальнейших исследованиях с помощью РЭМ и ПЭМ анализа участка разрушения образца.

Список литературы

1. Краев М.В., Краева В.С. Пластическая деформация металлов и сплавов с применением постоянного магнитного поля // *Материалы 6-й международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее»*. 2017. С. 75.
2. Gillon P. Uses of intense d.c. magnetic fields in materials processing // *Materials Science and Engineering: A*. 2000. V. 287. P. 146–152.
3. Misra P. *Diamagnetism and Paramagnetism*. Elsevier, 2012. 664 p.
4. Kadhemi M. *Ferromagnetism and Antiferromagnetism*. 2014.
5. Покоев А.В., Осинская Ю.В., Шахбанова С.Г., Ямщикова К.С. Магнитопластический эффект в алюминиевых сплавах // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2018. Т. 82, № 7. С. 961–964.
6. Pokoev A.V., Osinskaya J.V. Manifestation of Magnetoplastic Effect in Some Metallic Alloys // *Defect and Diffusion Forum*. 2018. V. 383. P. 180–184.
7. Li G.-R., Wang H., Li P.-S., Gao L.-Z., Peng C.-X., Zheng R. Mechanism of dislocation kinetics under magnetoplastic effect // *Acta Physica Sinica*. 2015. V. 64, N 14. 148102.
8. Коновалов С.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б., Дружилов А.С., Громов В.Е. Автоматизированная установка для регистрации и анализа ползучести металлов и сплавов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2007. № 8. С. 64–66.

9. Zagulyaev D., Konovalov S., Shlyarov V., Chen X. Influence of constant magnetic field on plastic characteristics of paramagnetic metals // *Materials Research Express*. 2019. V. 6, N 9. 096523.

10. Пинчук А.И., Шаврей С.Д. Корреляция между микротвердостью и подвижностью двойникующихся дислокаций в кристаллах висмута при приложении постоянного магнитного поля и импульсов тока // *Письма в ЖТФ*. 2002. Т. 28, Вып. 12. С. 80–84.

Информация об авторах

А. А. Серебрякова – аспирант кафедры ЕНД им. профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

Д. В. Загуляев – кандидат технических наук, доцент кафедры ЕНД им. профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

В. В. Шляров – аспирант кафедры ЕНД им. профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. Kraev, M. V. & Kraeva, V. S. (2017). Plastic deformation of metals and alloys using a constant magnetic field. *Proceedings of the 6th international conference «Space technologies: present and future»*. P. 75. (In Russ.).
2. Gillon, P. (2000). Uses of intense d.c. magnetic fields in materials processing. *Materials Science and Engineering: A*, (287), 146–152.
3. Misra, P. (2012). *Diamagnetism and Paramagnetism*. Elsevier. P. 664.
4. Kadhemi, M. (2014). *Ferromagnetism and Antiferromagnetism*.
5. Pokoev, A. V., Osinskaya, Yu. V., Shakhbanova, S. G. & Yamshchikova, K. S. (2018). Magnetoplastic effect in aluminum alloys. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Physical series*, 7(82), 961–964. (In Russ.).
6. Pokoev, A. V. & Osinskaya, J. V. (2018). Manifestation of Magnetoplastic Effect in Some Metallic Alloys. *Defect and Diffusion Forum*, (383), 180–184.
7. Li, G.-R., Wang, H., Li, P.-S., Gao, L.-Z., Peng, C.-X. & Zheng, R. (2015). Mechanism of dislocation kinetics under magnetoplastic effect. *Acta Physica Sinica*, 14(64), 148102.

8. Konovalov, S. V., Danilov, V. I., Zuev, L. B., Druzhilov, A. S. & Gromov, V. E. (2007). Automated installation for registration and analysis of the creep of metals and alloys. *Zavodskaya laboratory. material diagnostics*, 8, 64–66. (In Russ.).

9. Zagulyaev, D., Konovalov, S., Shlyarov, V. & Chen, X. (2019). Influence of constant magnetic field on plastic characteristics of paramagnetic metals. *Materials Research Express*, 9(6), 096523.

10. Pinchuk, A. I. & Chavrey, S. D. (2002). Correlation between microhardness and mobility of twinning dislocations in bismuth crystals under the application of a constant magnetic field and current pulses. *Pis'ma v ZHTF*, 12(28), 80–84. (In Russ.).

Information about the authors

A. A. Serebryakova – Postgraduate Student of the Department of Natural Science named after. professor V.M. Finkel Siberian State Industrial University.

D. V. Zagulyaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Science named after. professor V.M. Finkel Siberian State Industrial University.

V. V. Shlyarov – Postgraduate Student of the Department of Natural Science named after. professor V.M. Finkel Siberian State Industrial University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07.12.2022; одобрена после рецензирования 10.01.2023; принята к публикации 30.01.2023.

The article was received by the editorial board on 07 Dec. 22; approved after reviewing 10 Jan. 23; accepted for publication 30 Jan. 23.